

河南一次沙尘天气过程干空气 侵入的数值模拟及诊断分析

李 戈^{1,2} 寿绍文¹ 张广周² 白家惠² 朱丽娜²

(1. 南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 大气科学学院, 210044;

2. 河南省平顶山市气象局)

提 要: 利用 NCEP 再分析资料(水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)和同时的探空、地面资料对 2006 年 4 月 11—13 日发生在河南省的沙尘天气进行了中尺度数值模拟,并应用于干空气侵入的理论对这次过程进行了诊断和分析。结果表明,此次沙尘天气过程中存在明显的干空气侵入,且干空气侵入对沙尘天气产生重要作用;高位涡、低湿空气沿等相当位温线密集带向下滑,在对流层中低层引起位涡和温度扰动,造成强冷平流南下,使低槽东移加深、冷锋南压,触发不稳定大气,同时配合低层辐合、高层辐散叠置的流场,引发了河南省沙尘天气的发生、发展。

关键词: 沙尘天气 干空气侵入 数值模拟 诊断分析

Numerical Simulation and Diagnosis of Dry Intrusion in a Dust Storm Process of Henan Province During April 2006

Li Ge^{1,2} Shou Shaowen¹ Zhang Guangzhou² Bai Jiahui² Zhu Lina²

(1. Jiangsu Meteorological Disasters Key Lab and Institute of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, 210044; 2. Pingdingshan Weather Office, Henan Province)

Abstract: A dust weather process occurred in Henan Province during 11—13 April, 2006. By using NCEP re-analysis data (horizontal resolution $1^\circ \times 1^\circ$) and the simultaneous sounding, surface air observational records, a meso-scale numerical simulation and diagnostic analysis applying dry intrusion theory was made for this process. The results showed that the dry air intrusions obviously play a significant role in this process. The air of high potential vorticity and low humid slipped

资助项目:国家自然科学基金项目(40405009、40575022、40205008);江苏省气象局科技开发项目(200406);江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050201);国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418301);江苏省自然科学基金项目(BK2005141)

收稿日期:2007年1月15日; 修定稿日期:2007年8月7日

down southward along with dense strips of equivalent potential temperature, which caused disturbances of potential vorticity and temperature in mid-low level of troposphere. These disturbances led to strong cold advection southward and low pressure trough moving eastward and cold front southward, which affected together and triggered instable weather. Meanwhile with low level convergence and high level divergence, they caused this dust weather.

Key Words: dust storm dry air intrusion numerical simulation diagnostic analysis

引 言

沙尘暴天气是一种严重的灾害性天气现象,20 世纪 20 年代,国外学者率先开始对其时空分布特征、成因与结构以及监测与对策等进行了研究。之后,国内外学者在产生沙尘暴的天气系统、沙尘的起沙机制、卫星遥感监测、数值模拟等方面对沙尘暴进行了大量的研究,取得了显著的成就^[1-9]。

干空气侵入(dry intrusion)是指从对流层顶附近下沉到低层的干空气,具有高位势涡度(PV)和低湿球位温(θ_w)或低相对湿度(RH)两个特征^[10]。它在温带气旋的生成和发展、爆发性气旋的快速发展、次天气系统位势不稳定的发展以及中气旋发展和龙卷的生成中起着有利的促进作用,它影响锋面降水结构分布及演变特征^[10]。早在 20 世纪 60 年代,Danielsen E F 就曾绘制了干侵入气流的三维结构^[10]。目前主要用于暴雨、强对流等天气现象物理机制的研究^[11]。2006 年 4 月在河南省出现了一次罕见的沙尘天气过程。在对 2006 年 4 月 11—13 日河南省沙尘天气的研究中,发现对流层高层干侵入气流对河南省沙尘天气的影响不可低估。为此,主要针对这次沙尘过程中干侵入的源头,它引起低层温度扰动,诱发对流层中低层气旋的发展以及它的动力因素等进行了详细的研究,试图揭示干侵入引发温度扰动、气旋发展、促进对流加强、触发不稳定大气,引发河南省沙尘天气发生发展的基本机制,从而进

一步加深对河南省沙尘天气机理的认识。

1 过程简述

4 月上旬,500hPa 高空图上,亚欧中高纬地区两槽一脊形势明显。欧洲东北部阻塞高压形势稳定,冷空气在西西伯利亚地区堆积,旬末,随乌拉尔山阻高形势崩溃,一次强冷空气过程爆发,并引发 4 月 9—11 日入春以来影响我国范围最大,强度最强的强沙尘暴天气过程。受其影响,河南省出现了一次大范围的沙尘天气过程,伴随沙尘天气的发生,全省还出现了大幅度的强降温和明显的降水。4 月 11 日傍晚到夜间全省普遍出现了大风、沙尘天气,开封、平顶山、许昌 3 市大部 and 焦作、郑州、驻马店 3 市部分县共有 20 多个站最大风速超过了 $17.0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,新郑($19.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、鄢陵($22.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、许昌($22.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、郟县($23.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、平顶山($24.4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、叶县($25.4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、宝丰($31.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)7 站突破有气象记录以来最大风速极值。部分地区还出现了沙尘暴。此次沙尘天气给农业生产、电力输送、通讯和交通安全带来了许多不利影响。

从形势场上看,4 月 11 日 08 时,500hPa 高空图上, -44°C 冷中心东移南压到贝加尔湖东南部,高空槽由纬向型转变为经向型,东移到满州里、拐子湖、张掖、达日、林芝一线,同时,贝加尔湖以南的蒙古地区出现了一个相对暖的低压区,河南省处于槽前的西南气流里。地面图上,11 日 14 时,蒙古气旋已移

出黑龙江,冷锋位于佳木斯、天池、安阳、卢氏、安康、达川、成都、红原一线,冷锋后部等压线密集,高压中心为 1037.6hPa,锋区前后温度梯度大、气压梯度大,地面平均风力达 5~7 级,冷锋后部的西北大风卷夹着地面的尘土造成了河南省这次沙尘天气过程。

有利于这次沙尘天气爆发的气候背景主要是前期持续的高温少雨多风天气,加剧了土壤水分的散失,使得地表更为干燥、土质疏松,为这次沙尘天气的爆发提供了丰富的物质源。

2 过程模拟方案

利用 2006 年 4 月 10 日 20 时至 12 日 20 时每 6 小时一次的 NCEP 再分析资料(水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)和同时的探空、地面资料,采用非静力 MM5V3.7 中尺度模式对这次沙尘过程进行数值模拟,从 2006 年 4 月 10 日 20 时起,积分 48 小时,每隔 3 小时输出一次预报结果。每隔 6 小时输入一次新的侧边界值。格点结构采用双重嵌套网格,区域中心为 34°N 、 113°E ,粗网格格距 60km,细网格格距 20km,粗细嵌套网格格点数均为 61×61 ,垂直层数 23 层,模式顶气压 100hPa,积分步长 120s,每 3 小时输出一次模拟结果。动力学过程采用流体非静力平衡方案,模式粗网格采用 Betts-Miller 积云对流参数化方案,细网格采用 Grell 积云对流参数化方案,两重网格采用 MRF 的边界层参数化方案,粗网格采用松弛侧边界条件,细网格采用时变侧边界条件等,模式地形采用 NCAR($10'$ 和 $5'$)地形资料,经过中尺度客观分析和平滑,插值到 60km 网格点上。

3 模拟结果诊断分析

将模式积分 48 小时的 500hPa、700hPa、

850hPa 以及地面形势模拟结果,与其实况结果相比较,可以看出预报与实况基本一致,对于实况所描述的低槽、相伴锋区(等温线密集带)以及冷锋后部冷高压位置及中心强度,模式都作出了较好的预报,其中预报的 11 日 20 时 850hPa 温度场比实况场略偏北且它们的相关系数为 0.986039(图 1);预报的 11 日 20 时气压场与实况场的形状基本相似,锋区前后的气压梯度也大致相当,它们的相关系数为 0.975712,相关很好(图 2)。可以认为

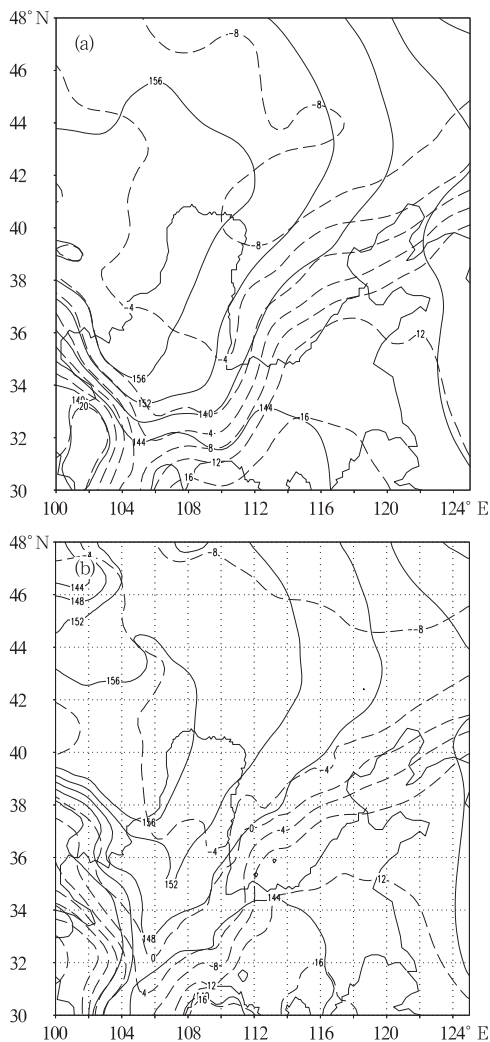


图 1 2006 年 4 月 11 日 20 时 850hPa 环流形势实况(a)与模式预报图(b)

高度场(实线,单位:10gpm),温度场(虚线,单位:℃)

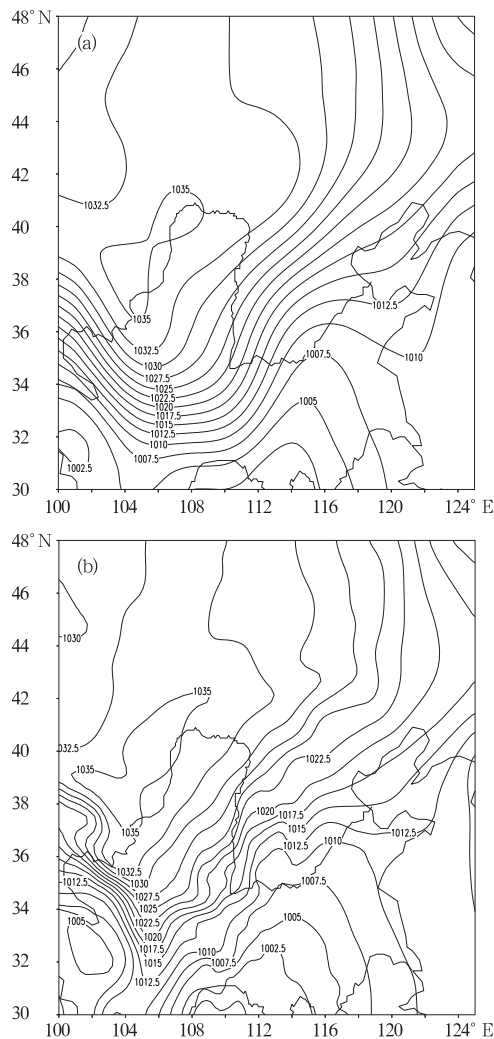


图 2 2006 年 4 月 11 日 20 时地面气压场实况(a)与模式预报图(b)(单位:hPa)

MM5 对这次沙尘天气有较强的模拟能力,用模式输出的粗网格动力协调资料来对这次过程进行诊断分析,能够反映这次沙尘天气影响系统的发展演变及动力机制,为河南省沙尘天气的预报提供可靠的参考依据。

4 干空气侵入分析

分析 10 日 20 时至 12 日 20 时模式输出的每 3 小时一次的沿 113°E 相对湿度及位涡

高度剖面图(图 3)(贯穿河南省沙尘区),发现:10 日 20 时,在 49~50°N、200~300hPa 对应高空急流为一片高值位涡区(大于 1PVU),其中心值达 5PVU 且呈漏斗状向下伸至 750hPa 附近,该区域对应相对湿度梯度较大区域,高值位涡中心对应相对湿度小于 16%的区域,此区域为这次过程干侵入的源头。该相对湿度低值区和位涡高值区不断向南向下伸展,11 日 14 时,对流层高层高位

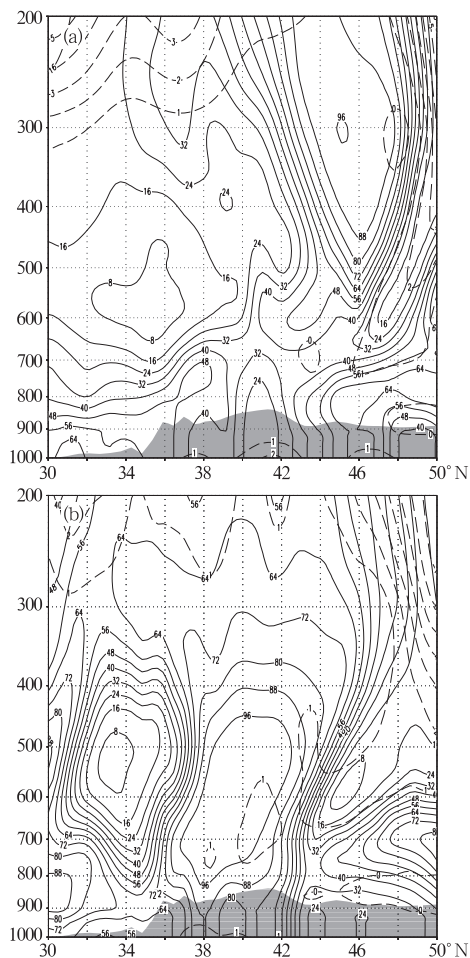


图 3 相对湿度(实线,单位%)、位涡线,单位:PVU,1PVU= $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)沿 113°E 经向垂直剖面图
(a) 2006 年 4 月 10 日 20 时
(b) 2006 年 4 月 11 日 14 时

涡区向南移了2个纬度,高值位涡区向下伸展的高度仍维持在750hPa附近,且向南在对流层中、低层分裂出小的位涡扰动。同时,低相对湿度区也随高位涡区一起向南向下伸展,相对湿度为32%的等值线由10日20时的45.5°N、650hPa向下向南伸展到43°N、750hPa附近。

分析每3小时一次的位涡与同时次相当位温沿113°E经向垂直剖面图(图4)发现,干空气侵入有沿等相当位温密集带向下滑

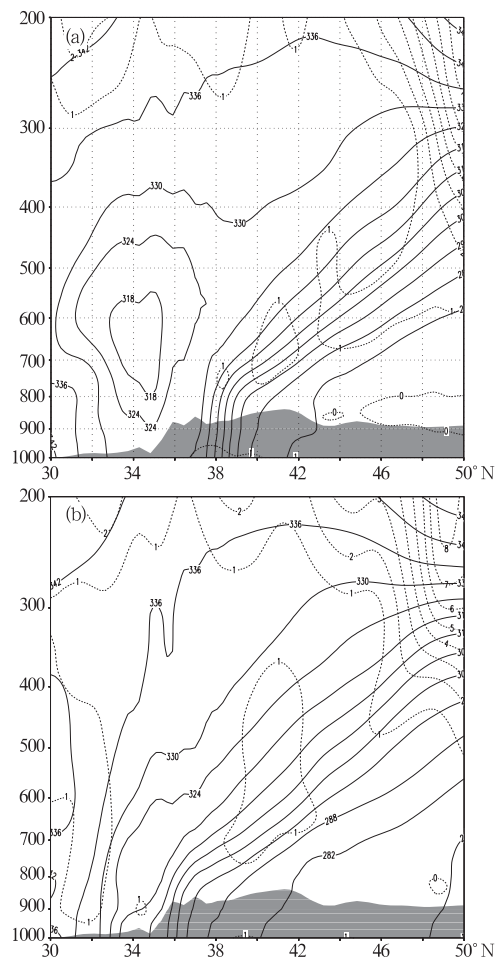


图4 相当位温(实线,单位:K)、位涡
虚线,单位:PVU, $1\text{PVU}=10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}$)
沿113°E经向垂直剖面图
(a) 2006年4月11日14时
(b) 2006年4月11日23时

的特点。10日20时,呈漏斗状向下伸展的高值位涡区位于对流高层等相当位温密集带上;此后,高层高位涡区进一步向下、向南伸展。11日14时,沿等相当位温密集带,高值位涡区向对流层中低层分裂出小的位涡扰动,不断下传到44°N以南、对流层中低层。11日23时,在河南省上空对流层中低层形成相对高值位涡区,这和河南省沙尘天气发生期一致。之后,随着高层位涡高值区不断向南扩展,河南省上空中低层相对高值位涡中心也随之南移。

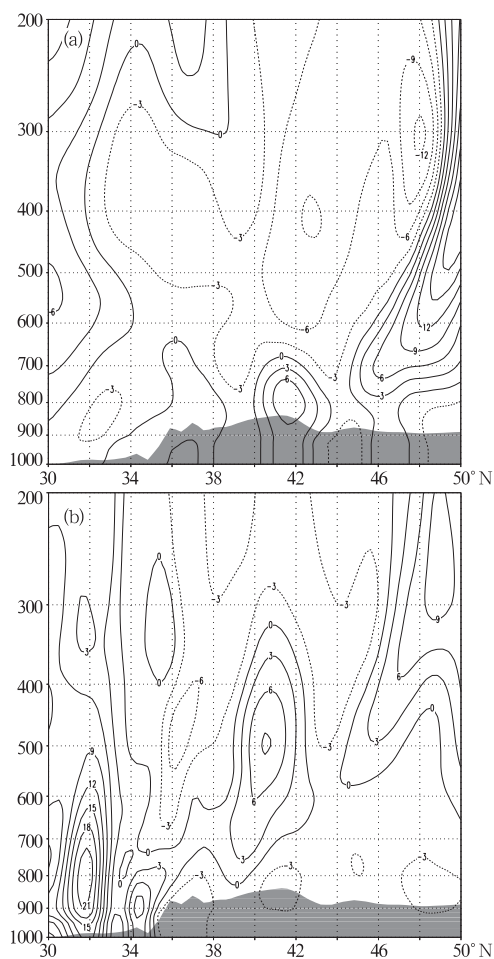


图5 沿113°E涡度经向垂直剖面图
(单位: 10^{-5}s^{-1})
(a) 2006年4月10日20时
(b) 2006年4月11日23时

5 干空气侵入对低层气旋的影响

根据位涡守恒原理,来自高层稳定度较大的环境的气流,到达低层稳定度较小的环境后其涡度增大,从而有利于引起气旋的发生、发展和强对流天气的形成。

分析模式输出的 10 日 20 时至 12 日 20 时每 3 小时一次的涡度场沿 113°E 经向垂直剖面图发现,10 日 20 时,与对流层高层高位涡、低湿空气向下南伸的区域一致,从蒙古地区向南同时从对流层高层到近地面层倾斜伸出一正涡度带,中心强度为 $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,位于蒙古地区的对流层中上层,河南省上空为大片负涡度区。之后,该倾斜的正涡度带不断南伸,于 11 日 17 时进入河南省境内,河南省上空 700hPa 以下为正涡度区,以上为大片负涡度区,低层正涡度区有利于气旋的发展。11 日 23 时,河南省上空为大片正涡度区,中心涡度较大值为 $21 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,位于 32°N 、850hPa 附近,气旋发展到了强盛阶段,这和沙尘天气发生的剧烈时段一致。随后逐渐减弱,12 日 14 时,河南省上空为大片负涡度区,气旋也逐渐南移。可见,干空气向下注入,对气旋的加深、移动,起了不小的作用。

6 干空气侵入对温度场的影响

当高层有正位涡扰动移到对流层低层时,可引起低层温度扰动。分析模式输出的 10 日 20 时至 12 日 20 时每 3 小时一次的温度场和温度平流场沿 113°E 经向垂直剖面图(图 6)发现,在高层高位涡低湿空气向下、向南传送的同时,高层冷空气也随之向下、向南传递。10 日 20 时,从蒙古地区向南同时从对流层中、上层到近地面层伸出一条冷舌、冷平流中心带,冷平流中心为 $-90 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,位于华北地区的 850hPa 上空。该冷舌、

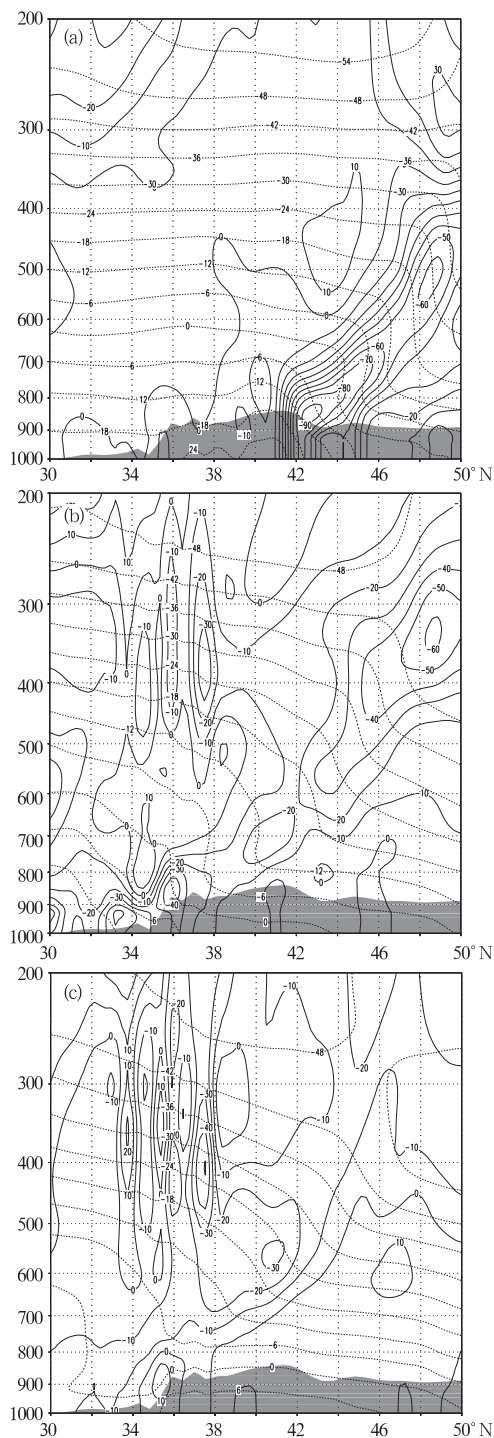


图 6 温度(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、温度平流(虚线,单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 113°E 经向垂直剖面图
(a) 2006 年 4 月 10 日 20 时 (b) 2006 年 4 月 12 日 02 时 (c) 2006 年 4 月 12 日 17 时

冷平流中心带不断南伸,12 日 02 时,其前沿进入河南省上空的近地面层,近地面层温度、冷平流中心强度分别达 0°C 左右和 $-50 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 。强冷平流使低槽东移、冷锋南压,冲击不稳定大气导致河南省这次沙尘天气的发生发展。12 日 14 时以后,河南省上空近地面层冷舌、冷平流逐渐减弱消失,弱的暖平流逐渐控制了这些地区,这次沙尘天气过程结束。

7 干空气侵入对散度场的影响

一般如果在低层辐合流场上空又有辐散流场叠置,那么抬升力更强,常会造成严重的对流性天气。

分析模式输出的每 3 小时一次的散度场沿 113°E 经向垂直剖面图发现,10 日 20 时,对应干空气入侵区域的南边存在一自下而上向北倾斜的负散度带,中心强度为 $-10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,位于 41°N 、850hPa 附近。该负散度带随干空气侵入南移,11 日 14 时,其前边界进入河南省境内,且低层辐合、高层辐散,并于 11 日 23 时,低层辐合高层辐散达最强,这时低层有两个辐合中心,一个位于 32°N 、950hPa 附近,中心值为 $-18 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,另一个位于 35°N 、950hPa 附近,中心值为 $-14 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。高层有两个辐散中心,一个位于 32°N 、500hPa 附近,中心值为 $8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,另一个位于 35°N 、650hPa 附近,中心值为 $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,低层辐合高层辐散最强时段和河南省这次沙尘天气发生的剧烈时段一致,之后随低层辐合高层辐散场减弱,垂直上升运动也逐渐减弱,这次沙尘天气过程趋于结束。

8 大气稳定度分析

$\frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 表示稳定度,当 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ 时表示大气

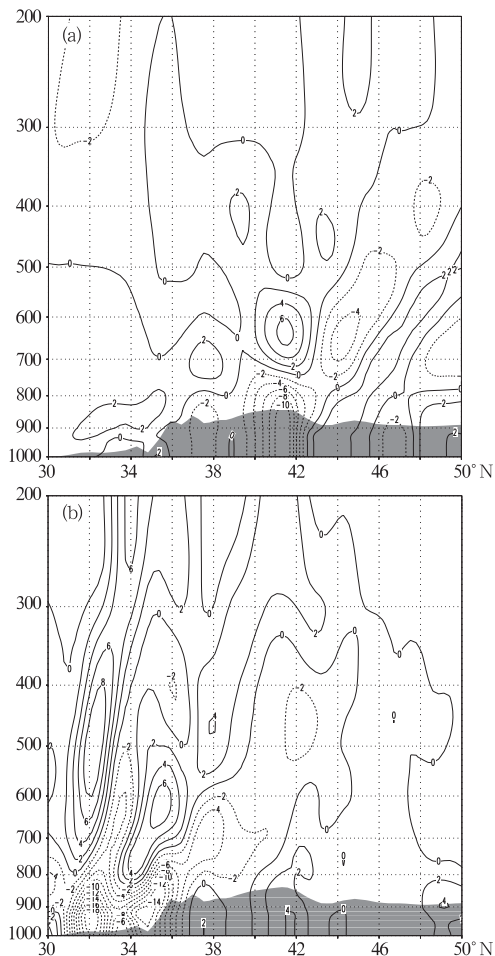


图 7 沿 113°E 散度经向垂直剖面图
(单位: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 2006 年 4 月 10 日 20 时

(b) 2006 年 4 月 11 日 23 时

为对流性不稳定。分析模式输出的 10 日 20 时至 12 日 20 时每 3 小时一次的相当位温 θ_e 沿 113°E 经向垂直剖面图(图略)发现:10 日 20 时,河南省上空,在 700hPa 附近已存在一个 316K 的等相当位温闭合线,近地面层的等相当位温线值为 320K,700hPa 以下存在 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$,即大气为对流性不稳定层结。之后,该不稳定区略向南、向北扩展,316K 的等相当位温闭合线略上抬,11 日 17 时,316K 的等相当位温线闭合中心位于 650hPa 附近,

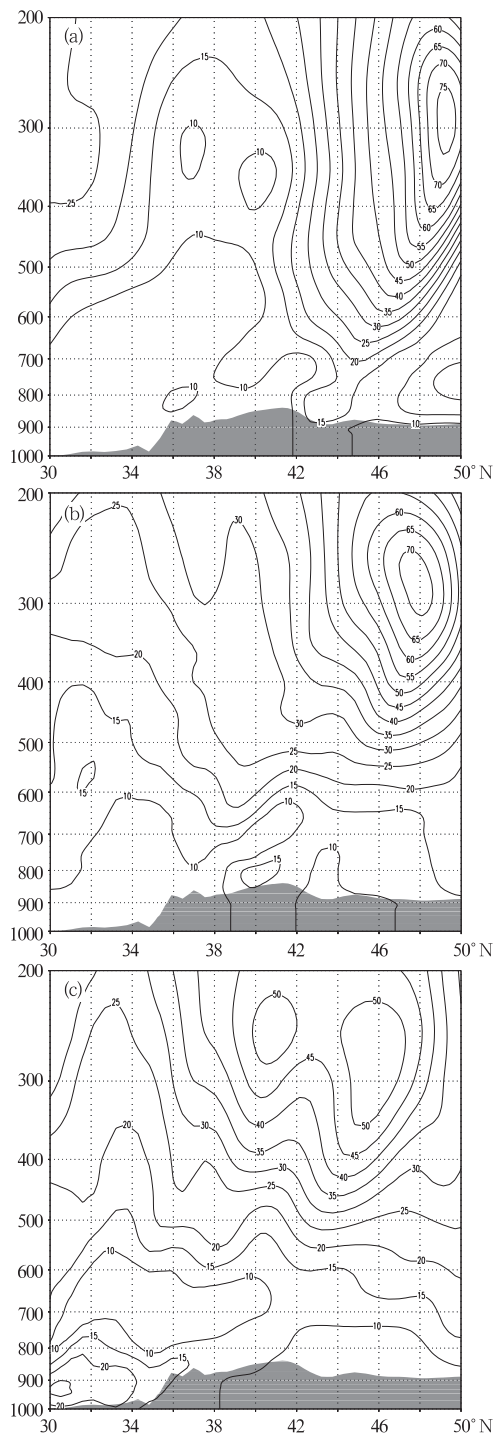


图 8 全风速沿 113°E 经向垂直剖面图

(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 2006 年 4 月 10 日 20 时 (b) 2006 年 4 月 11 日 14 时 (c) 2006 年 4 月 12 日 05 时

近地面层等相当位温线值为 328K, $\frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 值达最大, 大气对流性不稳定增强。这说明在这次沙尘天气过程之前, 河南省上空在对流层中、低层已存在对流性不稳定大气, 且在沙尘天气爆发时, 不稳定性达最强。从 11 日 20 时以后, 河南省上空整层大气迅速转变为稳定性层结状态 (即 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$), 也就是说, 这次沙尘天气过程的最强时段出现在稳定的大气层结中。

9 高低空急流的演变

分析模式输出的每 3 小时一次的全风速沿 113°E 经向垂直剖面图 (图 8) 发现, 10 日 20 时, 高空急流中心位于 49°N、300hPa 附近, 中心风速达 $75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 河南省上空无低空急流。10 日 20 时至 11 日 11 时, 该高空急流较稳定。从 11 日 14 时起, 高空急流开始大举东移南压, 河南省上空 600hPa 以下出现了低空急流。12 日 05 时, 高空急流存在两个中心, 一个位于 41°N、250hPa 附近, 另一个位于 47°N、300hPa 附近, 中心风速减小为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这时河南省上空存在明显的低空急流, 且风速达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 期间正是河南省出现沙尘大风的时段, 因高空急流风速减小而引起的动量下传, 致使近地面风速增大, 冲击不稳定大气, 爆发了河南省这次沙尘天气过程。随后, 随高空急流南移, 河南省上空低空急流的减弱, 这次沙尘天气过程结束。

10 小 结

2006 年 4 月河南省沙尘天气过程是在前期高温少雨多风的气候背景下, 受强冷空

气和蒙古气旋影响造成的。利用非静力中尺度数值模式 MM5 对这次过程作了数值模拟和诊断分析,得出如下结论:

(1) 非静力中尺度模式 MM5V3.7 能较好地模拟出这次过程中锋区及地面冷高压的发生发展。

(2) 分析模式输出的每 3 小时一次的相对湿度及位涡高度剖面图,可以看出,干空气侵入在这次过程中起着非常重要的作用。高位涡、低湿空气沿等相当位温密集带向南下滑,在对流层中低层分裂出小的位涡扰动,引起低层温度扰动,高、低层位涡和温度扰动以及它们诱发的环流共用作用,便造成了气旋的发生和发展。

(3) 干侵入引发低层温度扰动,造成强冷平流南下,使低槽东移、冷锋南压触发不稳定大气,同时配合低层辐合高层辐散叠置的流场,从而引起河南省这次沙尘天气过程。

(4) 这次沙尘天气爆发时,大气层结表现为不稳定状态,但过程的最强时段却出现在稳定的大气层中。

(5) 在这次沙尘天气过程中,因高空急流风速减小引起的动量下传是地面产生大风

及沙尘的动力因素。

参考文献

- [1] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 616-622.
- [2] 康风琴, 李耀辉, 吕世华. 2001 年 4 月 8 日强沙尘暴天气的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 681-685.
- [3] 李艳春, 赵光平, 胡文东, 等. 宁夏中北部沙尘暴过程中气象要素变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 212-217.
- [4] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4. 22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37: 26-35.
- [5] 胡文东, 高晓清. “2001. 4. 6”宁夏沙尘暴过程卫星云图分析[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 590-596.
- [6] 唐国利, 巢清尘. 中国近 49 年沙尘暴变化趋势的分析[J]. 气象, 2005, 31(5): 8-11.
- [7] 薛建军, 刘月巍, 牛若芸, 等. 2002 年 3 月 18—22 日强沙尘暴过程分析[J]. 气象, 2004, 30(9): 39-44.
- [8] 申红喜, 李秀连, 石步鸿. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程的对比分析[J]. 气象, 2004, 30(2): 12-16.
- [9] 张海霞, 蔡守新, 尤凤春, 等. 冀南地区一次强对流型强沙尘暴成因分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 69-76.
- [10] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769-778.
- [11] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 276-285.